

文章编号: 1001—1749(2002)02—0163—06

用MATLAB 实现地震数据的小波变换

李晋平, 王大庆, 许新刚

(中国矿业大学 地球信息技术系, 江苏 徐州 221008)

摘要: 小波变换借助于时—频局部分析特性, 已经成为地震资料处理中的一种重要工具。作者在阐述其基本原理后, 讨论了如何选择小波基(函数), 并利用MATLAB 语言及小波工具箱, 实现了SEG-Y 格式地震数据文件的小波分析, 取得了令人满意的效果。

关键词: 小波变换; 时—频局部性; 小波基; 地震数据

中图分类号: P631.4⁺2 **文献标识码:** A

IMPLEMENTING WAVELET TRANSFORM OF SEISMIC DATA USING MATLAB

LI Jin-ping, WANG Da-qing, XU Xin-gang

(Department of the Earth Information Technology, China University of Mining
and Technology, Xuzhou Jiangsu 221008, China)

Abstract: Wavelet transform, depending upon the property of time-frequency localization, has already been an important tool in seismic data processing. The authors explain the basic theory and discuss the selection of wavelet basis(function), Then we make use of the MATLAB language and its wavelet toolbox to implement wavelet analysis of seismic data file with SEG-Y format and the results show the efficiency of the method.

Key words: wavelet transform; time-frequency localization; wavelet basis; seismic data

0 引言

小波概念首先是由法国从事石油信号处理的地球物理学家J. Morlet 在1984年提出来的。后来, 数学家Y. Meyer 构造了具有一定衰减性质的光滑小波函数 ψ , 而I. Daubechies 构造了具有有限支集的正交小波基。1989年, S. Mallat 与Y. Meyer 合作建立了构造小波基的通用方法-多尺度分析MRA (Multi-Resolution Analysis), 并提出了著名的Mallat 快速算法, 使小波变换成为重要的实用工具。

传统的傅里叶变换是一种纯频域的分析方法, 时频分析比较差。小波变换不仅继承和发展了窗口傅里叶变换的局部化思想, 而且克服了窗口大小不随频率变化、缺乏离散正交基的缺点, 这在理论和实际应用中都是非常重要的性质。借助小波变换, 可以进行时频局部分析, 小波变换在地震勘探领域具有很大的应用潜力。

MATLAB 是一种优秀的数值计算编程语言, 主要功能有: 数值分析、矩阵运算、信号处理和图形显示。MATLAB 还为不同领域的专业人员提供了扩展的工具箱, 从而方便了学习和使用。作者在本文中通

过使用 MATLAB 中的小波分析工具箱, 编制了 MATLAB 程序, 实现了 SEG-Y 地震数据格式文件的小波分析。输入为原始剖面文件, 输出为同样格式的 SEG-Y 小波各尺度分解剖面文件。从整个实现过程来看, 我们可以充分体会 MATLAB 在解决实际问题上的方便性和高效性。

1 小波变换及其分类

小波函数的确切定义为: 设 $\psi(t)$ 为一平方可积函数 (即 $\psi(t) \in L^2(R)$), 若其傅里叶变换 $\Psi(\omega)$ 满足条件

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (1)$$

则称 $\psi(t)$ 为一个基本小波或小波母函数, 并称式(1)为小波函数的允许条件。函数 $f(t)$ 的连续小波变换的表达式为:

$$WT_f(a, b) = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (2)$$

其中 $\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 称为依赖于参数 a, b 的小波基函数。

1.1 连续小波变换

连续小波变换是指尺度参数 a 和平移参数 b 连续变化。连续小波在计算机实现时, 必须加以离散化, 这一离散化都是针对连续的尺度参数 a 和平移参数 b 进行的。由于有许多好性能 of 连续小波变换, 诸如平移不变性、伸缩共变性以及冗余性等, 都非常适合于做信号分析, 所以在连续小波变换中, 仅要求小波函数满足式(1)的允许条件即可, 这样我们在处理实际问题时选择小波就有很大的自由度。连续小波变换的冗余性在去噪、进行数据恢复及特征提取时, 均可以获得好的效果, 但这需要以牺牲计算量、存储量为代价。

1.2 离散小波变换

把连续小波变换中的尺度参数 a 和平移参数 b 的离散化形式分别取作 $a = a_0^k, b = k \cdot a_0^k \cdot b_0$ 。在实际中, 常取 $a_0 = 2, b_0 = 1$, 即取二进制小波。为了能够使用著名的 Mallat 快速算法, 离散小波变换多采用正交小波变换的形式, 即要求所选小波是正交小波。选用正交小波进行离散变换没有连续小波的变换系数的冗余性, 在保证不丢失原始信号信息的情况下, 可以大大地减少计算量。

2 小波基(函数)的选取

与标准傅里叶变换相比, 小波分析中所用的小波函数不具有唯一性, 即小波函数 $\psi(t)$ 具有多样性 (我们可以选择非正交小波、正交小波、双正交小波、甚至是线性相关的)。在小波分析的工程应用中, 一个很重要的问题是最优小波基的选取问题, 这是因为应用不同的小波基解决同一个问题会产生不同的结果。另外, 根据要从信号中提取的信息不同, 也应恰当地选择小波和构造小波函数。

作者在本文中针对地震信号处理的要求, 首先从理论上讨论了小波函数的选取准则, 并利用小波分析后重构信号和原始信号的误差大小来比较判定小波基函数的好坏, 最终选定解决实际问题的最优小波基。

在对地震信号进行小波分析时, 我们可以考虑选择和地震子波形状很相近的波形作为小波 (满足允许条件)。常见的地震子波有零相位子波, 最小相位子波和混合相位子波等, 文献[1]给出了这些常用地震子波的模拟公式。此外, 我们会注意到, 存在的各种小波中, 有很多核小波函数和地震子波的形状很相近, 也可以用来做试验。

连续小波变换是一种冗余变换, 子波在空间两点之间的关联增加了分析解释变换结果的困难, 而离散的正交小波变换则不会出现这种缺陷。选择和构造一个正交小波要求其具有一定的紧支集、平滑性和对称性。紧支集保证有优良的空间局部性质; 对称性保证子波的滤波特性有线性相移, 不会造成信号的失真; 平滑性保证频率分辨率的高低。但是上述三点不可能同时得到满足。紧支撑性与平滑性二者不可兼得, 要求小波具有较高的光滑性, 必然要求增加小波支集的长度; 反之, 为了保证小波分析的局部特性, 利于算法实

现, 支集的长度要尽量小, 但这又保证不了光滑性。综合考虑, 我们必须采取某种折衷作法, 保证一定的紧支撑性、对称性和平滑性来选择正交小波。

我们选用 db4 小波抽取某一标准道地震数据进行离散小波变换, 变换结果如图 1 所示。

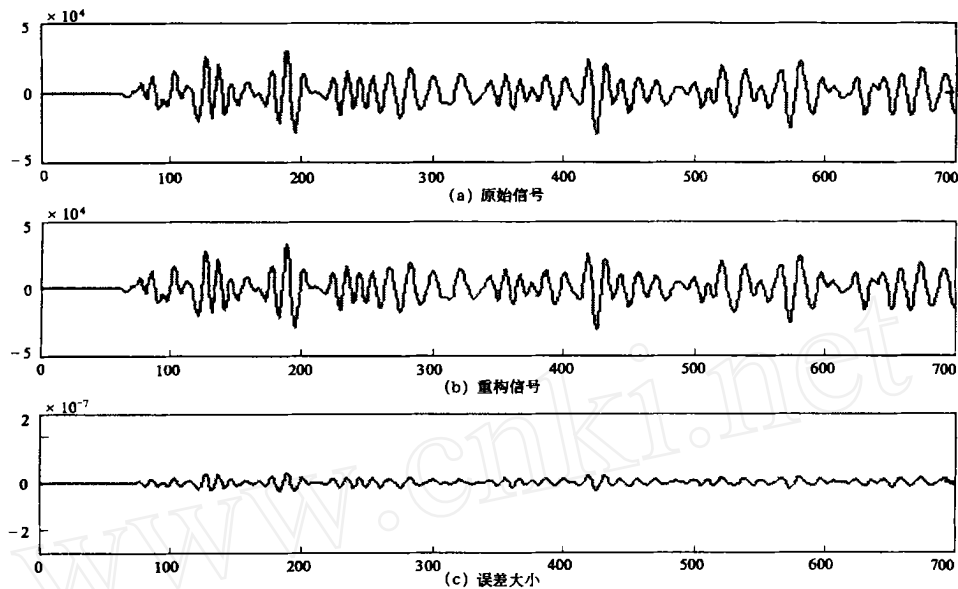


图 1 误差分析图

Fig 1 Error analysis

由图 1 可以看出, 原始信号和重建信号完全一样, 只是有微小的误差, 误差数量级为 10^{-7} 。这说明我们选用的小波来分解和重构信号是可行的。

下面我们考虑两种情况来对误差结果进行分析:

- (1) 滤波器长度不同(选择同一家族小波, 如对于 db 族某一小波 dbN, 滤波器长度为 $2N$)。
- (2) 滤波器长度相同(不同家族小波, 选择 db 族小波和 sym 族小波)。

误差的标准有两种: 最大误差(一道地震记录中所有误差值的绝对值的最大值);
平均误差(一道地震记录中所有误差绝对值的和的平均)。

表 1 滤波器长度不同的误差结果比较

Tab 1 Comparison of different filter-length error results

	db1	db2	db3	db4	db5	db6	db7	db8	db9
最大误差	1.4552×10^{-11}	7.3949×10^{-8}	6.5037×10^{-7}	1.1579×10^{-7}	1.5385×10^{-7}	8.0119×10^{-8}	1.3381×10^{-7}	2.6918×10^{-6}	2.8965×10^{-6}
平均误差	3.1172×10^{-12}	1.3685×10^{-8}	1.4720×10^{-7}	2.6680×10^{-7}	3.8607×10^{-7}	2.0870×10^{-8}	3.3726×10^{-8}	6.5092×10^{-8}	7.0343×10^{-7}

表 2 滤波器长度相同的误差结果比较

Tab 2 Comparison of same filter-length error results

	db4	sym4		db8	sym8
最大误差	1.1579×10^{-7}	5.0964×10^{-8}	最大误差	2.6918×10^{-7}	1.3697×10^{-8}
平均误差	2.6880×10^{-8}	1.2880×10^{-8}	平均误差	7.0343×10^{-7}	3.3837×10^{-9}

(注: db 是指数学家 J Daubenchies 提出的一组小波的简称)

误差结果分析:

对于支集长度较小的 db1、db2、db3 小波来说, 由于小波的光滑度不够, 重构信号的误差都比较大。而对于 db7—db9 小波来说, 随着滤波器长度的增加, 紧支集区间也变大, 小波的光滑性得到了保证。但误差逐渐增大说明了由于支集长度的增加, 局部性下降。从 db4 和 db6 小波中可以看出, 在所有 db 家族小波

中, 误差较小的有两个, 说明这两种小波能够很好地顾及正交小波的紧支集和平滑性。

对于滤波器长度相同(支集长度相同)的不同小波类型来说, 我们看出在选定的两种滤波器长度下, sym 族小波都优于 db 族小波。从两种类型的小波函数图形可以看出, sym 族小波比 db 族小波与地震子波更为相近, 理论分析和误差结果说明了这一点。

3 MATLAB 语言实现小波变换

使用上面的误差分析方法, 我们选择比较好的、适合地震数据处理的小波基函数, 运用 MATLAB 语言编制小波程序来实现小波分析。

3.1 小波变换程序的实现

```
function For_cwt(Filein, Fileout, traces, samples, scale, wavelet)
% For_cwt(Filein, Fileout, traces, samples, scale, wavelet) 连续小波变换
% 输入 Filein: 原始的地震剖面文件(*.sgy)
%       Fileout: 小波分解剖面文件(*.sgy)
%       traces: 整个剖面文件的总道数
%       samples: 每一道地震记录的采样点数
%       scale: 小波变换尺度值
%       wavelet: 小波类型: morl, Morlet 小波; gaus, Gaussian 小波; mexh, 墨西哥帽子小波
% 输出 生成由输入所指定的小波分解剖面文件
Infile= char(Filein)
Outfile= char(Fileout)
Type= char(wavelet)
fp1= fopen(Infile, 'r'); % 打开一原始的输入文件
fp2= fopen(Outfile, 'w'); % 要写入的小波分解剖面文件
cc= fread(fp1, 1800, 'integer * 2'); % 读取 sgy 文件的文件头信息
fwrite(fp2, cc, 'integer * 2');
for k= 1: traces % 循环处理
    bb= fread(fp1, 120, 'integer * 2'); % 读取 sgy 文件的道头信息
    fwrite(fp2, bb, 'integer * 2');
    s= fread(fp1, samples, 'integer * 2'); % 读出一道数据
    w= cwt(s, scale, wavelet); % 小波变换后该道的变换系数数据
    fwrite(fp2, w, 'integer * 2'); % 将该道的小波变换数据写入到文件中
end
fclose(fp1);
fclose(fp2);
function For_dwt(Filein, traces, samples, wavelet)
% function For_dwt(Filein, traces, samples, wavelet) 离散小波变换
% 输入 Filein: 原始的地震剖面文件(*.sgy)
%       traces: 整个剖面文件的总道数
%       samples: 每一道地震记录的采样点数
%       wavelet: 小波类型; 可供选择的有 Daubechies 小波、Coiflets 小波、Symlets 小波等
% 输出 生成不同分层结构的小波分解剖面文件
%       本程序以 3 层分解为例。wav01.sgy 表示尺度 1 的小波分解剖面文件(*.sgy)
Infile= char(Filein)
Type= char(wavelet)
```

```

fp= fopen( Infile, 'r' );
fp1= fopen( wav01.sgy, 'w' );
fp2= fopen( wav02.sgy, 'w' );
fp3= fopen( wav03.sgy, 'w' );
cc= fread(fp, 1800, 'integer * 2'); % 读取 sgy 文件的文件头信息
fwrite(fp1, cc, 'integer * 2'); % 写入
fwrite(fp2, cc, 'integer * 2');
fwrite(fp3, cc, 'integer * 2');
for k= 1: traces
    bb= fread(fp, 120, 'integer * 2'); % 读取 sgy 文件的道头信息
    fwrite(fp1, bb, 'integer * 2');
    fwrite(fp2, bb, 'integer * 2');
    fwrite(fp3, bb, 'integer * 2');
    s= fread(fp, samples, 'integer * 2'); % 读出一道地震数据
    [C, L]= wavedec(s, 3, wavelet); % 3 层分解
    a1= wcoef( a, C, L, wavelet, 1); % 对应该道的尺度 1 低频系数重构
    fwrite(fp1, a1, 'integer * 2');
    a2= wcoef( a, C, L, wavelet, 2); % 对应该道的尺度 2 低频系数重构
    fwrite(fp2, a2, 'integer * 2');
    a3= wcoef( a, C, L, wavelet, 3); % 对应该道的尺度 3 低频系数重构
    fwrite(fp3, a3, 'integer * 2');
end
fcbse(fp);
fcbse(fp1);
fcbse(fp2);
fcbse(fp3);
% 小波变换例子
traces= 280; samples= 700; scale= 1.5
>> For_cwt('329stk.sgy', '329cwt.sgy', traces, samples, scale, 'morl') % 连续小波变换
>> For_dwt('329stk.sgy', traces, samples, 'db4') % 离散小波变换
% '329stk.sgy' 是一原始地震剖面文件, 'morl' 和 'db4' 分别为所选的小波。

```

图形显示:

由于输入和输出数据文件格式为 SEG-Y 格式文件, 所以这里我们采用方便的地震资料处理软件 V ista66 来完成数据的显示。

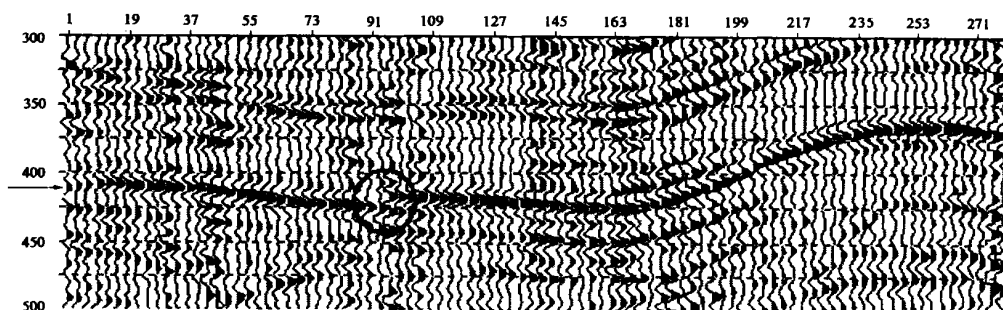


图 2 山东许厂地区某一原始地震剖面

Fig 2 Original seismic profile of Shandong Xuchang area

3.2 计算实例

图2为山东许厂地区某一地震剖面的局部,目的层3煤在410ms附近,在第90~100道间发现有断点存在。其小波分解剖面(最佳尺度)如图3所示。

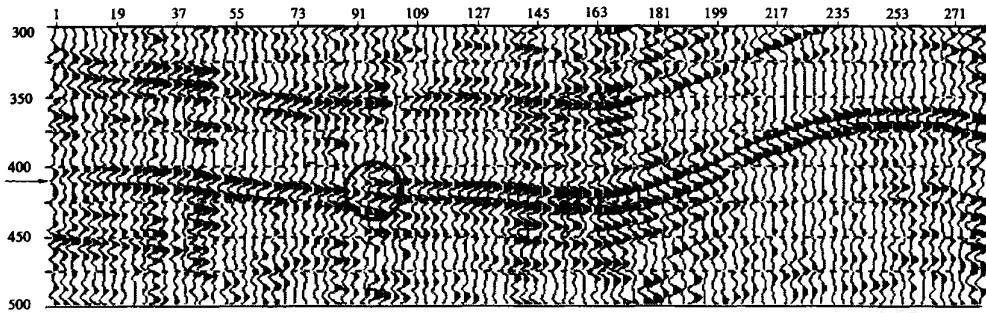


图3 山东许厂地区某一小波分解剖面

Fig. 3 Wavelet decomposing profile of Shandong Xuchang area

可以看到,利用小波变换能够将目的层3煤煤层顶底板干涉在一起的复合波分解成两个独立的反射波,这样我们就可结合钻孔资料来确定煤层厚度。另外,小波分频剖面提高了地震信号的频率,使波组关系变得清晰,可以有效地识别断层。

4 结论

(1) 对前人在选取小波基函数的经验基础上,从定量的角度通过比较重构信号和原始信号的误差,可以给出如何选择小波基的一种方法。

(2) 借用MATLAB中的小波工具箱的优势在于:研究人员无须在格式转换和计算编程上花费大量的时间,使用小波工具箱中的函数可以对存储格式不同的地震数据文件编制简单易懂的MATLAB程序。作者在本文中实现了对SEG-Y地震数据文件的小波处理,可以很方便地用来解决实际问题。

(3) MATLAB语言为工程技术人员提供了强大的数值计算和显示平台,对于物探人员来说,用来研究各种新的地震技术和开发好的处理模块,可以节省大量的时间。

参考文献:

- [1] 高静怀,汪文秉,朱光明,等.地震资料处理中小波函数的选取研究[J].地球物理学报,1996,39(3):392
- [2] 彭玉华.小波变换与工程应用[M].北京:科学出版社,2000
- [3] 胡昌华.基于MATLAB的系统分析与设计——小波分析[M].西安:西安电子科技大学出版社,2000
- [4] 仲其涛,王辉,庞留彦,等.利用小波变换提高煤层厚度的分辨能力[J].物探化探计算技术,2000,22(4):326
- [5] 白志信,金丹峰,朱光明,等.小波变换在煤田高分辨率地震资料处理中的应用研究[J].中国煤田地质,1996,8(增):69
- [6] 高静怀,朱光明,汪文秉,等.小波变换与地震资料谱白化[J].煤田地质与勘探,1997,25(3):44

作者简介:李晋平(1977—),男,中国矿业大学地球探测与信息技术专业在读硕士研究生,主要研究方向为小波分析。